

Studi Optimasi Moderasi Neutron Dalam Teras HTR Pebble Bed
(Zuhair, Suwoto, Ign. Djoko Irianto)

STUDI OPTIMASI MODERASI NEUTRON DALAM TERAS HTR PEBBLE BED

Zuhair, Suwoto, Ign. Djoko Irianto

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir (PTRKN) – BATAN
Kawasan Puspiptek, Gedung No. 80, Serpong – Tangerang 15310
Tel: 021-7560912, Faks: 021-7560913, Email: zuhairbasjmeleh@yahoo.com

Masuk: 4 Oktober 2010

Direvisi: 15 Oktober 2010

Diterima: 1 Desember 2010

ABSTRAK

STUDI OPTIMASI MODERASI NEUTRON DALAM TERAS HTR PEBBLE BED. Dalam HTR pebble bed, moderasi neutron sangat dipengaruhi oleh rasio bola moderator (M) dan bola bahan bakar (F) yang terdapat dalam teras reaktor. Moderasi optimal dapat dicapai dengan mengatur rasio F/M , namun kombinasi bola dengan rasio F/M lebih dari 1:1 dalam teras reaktor pebble bed menimbulkan masalah dalam perhitungan. Metode untuk menyelesaikan masalah ini didiskusikan dalam makalah ini. Optimasi moderasi dalam teras HTR pebble bed diinvestigasi dengan melakukan serangkaian perhitungan menggunakan program transport Monte Carlo MCNP5. Model bola bahan bakar dengan kernel UO_2 dan bola moderator dengan densitas grafit spesifik dipilih agar sesuai dengan desain mutakhir HTR pebble bed. Pustaka data nuklir energi kontinu ENDF/B-VI dimanfaatkan untuk melengkapi analisis optimasi moderasi. Hasil perhitungan memperlihatkan bahwa nilai k_{eff} memiliki tendensi semakin meningkat dengan bertambahnya rasio F/M kemudian menurun secara perlahan setelah mencapai nilai tertentu. Rasio F/M yang besar menyebabkan nilai k_{eff} berkurang karena tangkapan resonansi neutron (under-moderated). Rasio F/M yang kecil menyebabkan nilai k_{eff} berkurang karena absorpsi neutron parasitik oleh moderator (over-moderated). Dari seluruh hasil perhitungan dapat disimpulkan bahwa optimasi moderasi neutron dalam teras HTR pebble bed dicapai dengan kombinasi bola yang dispesifikasikan oleh rasio F/M 3:2.

Katakunci: moderasi neutron, faktor multiplikasi, HTR pebble bed, MCNP5

ABSTRACT

STUDY ON OPTIMIZING NEUTRON MODERATION IN HTR PEBBLE-BED CORE. In HTR pebble bed, the neutron moderation is strongly influenced by the ratio of the fuel pebbles (F) and the moderator pebbles (M) contained in the reactor core. Optimum moderation can be achieved by adjusting the ratio F/M , but the combination of the pebble with the ratio of F/M more than 1:1 in pebble bed reactor core raises a problem in the calculation. This paper discusses a method to solve this problem. Optimizing neutron moderation in the HTR pebble bed core was investigated by conducting a series of calculations using Monte Carlo transport code MCNP5. The model of the fuel pebble with UO_2 kernel and the moderator pebble with specific density of graphite was chosen to fit the current design of HTR pebble bed. The continuous energy nuclear data library ENDF/B-VI was used to complete the analysis of moderation optimization. The calculation results show that the values of k_{eff} tend to increase in line with the rise of ratio of F/M and go down slightly after a particular value. A large ratio of F/M causes a decrease in k_{eff} value because of the resonance neutron capture (under-moderated). A small ratio of F/M causes a decrease in k_{eff} value because of parasitic neutron absorption by the moderator (over-moderated). From all calculation results it can be concluded that the neutron moderation optimization of HTR pebble bed core is achieved with a combination of pebbles which is specified by the ratio of F/M 3:2.

Keywords: neutron moderation, multiplication factor, HTR pebble bed, MCNP5

1. PENDAHULUAN

Jumlah penduduk dunia diprediksi akan tumbuh dari sekitar 6 milyar ke 10 milyar penduduk dalam dekade mendatang. Bersamaan dengan meningkatnya standar hidup, pertumbuhan ini diperkirakan menyebabkan permintaan energi yang makin tinggi dan sangat besar^[1]. Untuk mengatasi permintaan energi yang meningkat sementara cadangan bahan bakar fosil semakin langka, dibutuhkan pasokan energi yang tidak hanya dapat diandalkan dan efektif dari segi biaya, tetapi juga aman dan bersih. Energi nuklir yang terbukti ramah lingkungan diharapkan akan memainkan peran penting untuk pemenuhan kebutuhan energi dunia masa depan.

Untuk meningkatkan peran sistem energi nuklir di masa mendatang pada tahun 2000 telah dibentuk proyek pengembangan sistem energi nuklir Generasi IV^[2]. Diantara konsep desain reaktor nuklir Generasi IV, reaktor temperatur tinggi HTR (*high temperature reactor*) adalah konsep reaktor yang paling menjanjikan karena karakteristik keselamatan melekat (*inherent safety*), fleksibilitas daur bahan bakar dan temperatur pendinginnya yang tinggi. Karakteristik ini menyebabkan HTR memiliki kelebihan dalam efisiensi termal dan potensi untuk aplikasi panas proses seperti produksi hidrogen, pengambilan minyak sisa (*enhanced oil recovery*), gasifikasi dan pencairan batu bara, dan lain-lain.

Teknologi HTR saat ini sedang dikembangkan di berbagai belahan dunia. Konstruksi reaktor uji temperatur tinggi HTTR (*high temperature test reactor*)^[3] berdaya termal 30 MW dengan perangkat bahan bakar berbentuk blok heksagonal (prismatik) telah dioperasikan secara sukses sejak tahun 1987 oleh Jepang. HTR-10^[4] dengan geometri *pebble bed* saat ini sedang beroperasi di Cina dan reaktor modular *pebble bed* PBMR (*pebble-bed modular reactor*)^[5] 400 MW di Afrika Selatan sedang dalam pengembangan. Serupa dengan PBMR, reaktor temperatur tinggi modular turbin gas GT-MHR (*gas turbine-modular helium reactor*)^[6] sedang dalam taraf desain di USA dan Rusia dengan desain teras prismatik. Investigasi lainnya yang saat ini sedang dikerjakan adalah konsep reaktor berpendingin gas Generasi IV: reaktor cepat berpendingin gas GFR (*gas-cooled fast reactor*) yang berkelanjutan tinggi karena daur bahan bakar tertutupnya dan reaktor temperatur sangat tinggi VHTR (*very high temperature reactor*) yang memiliki tingkat ekonomi panas tinggi karena efisiensi produksi hidrogennya.

Dalam HTR *pebble bed*, moderasi neutron sangat dipengaruhi oleh rasio jumlah bola bahan bakar (F) dan bola moderator (M) yang terdapat dalam teras reaktor. Moderasi optimal dapat dicapai dengan mengatur rasio F/M, namun kombinasi bola dengan rasio F/M lebih dari 1:1 dalam teras reaktor *pebble bed* menimbulkan masalah dalam perhitungan seperti spesifikasi rasio F/M 57:43 yang digunakan dalam teras *start-up* HTR-10. Metode untuk menyelesaikan masalah ini kemudian didiskusikan dalam makalah ini. Tujuan studi ini adalah untuk mendapatkan moderasi neutron yang optimal dalam teras HTR *pebble bed* dengan melakukan investigasi kriticalitas untuk berbagai rasio F/M melalui serangkaian perhitungan menggunakan program transport Monte Carlo MCNP5^[7]. Model bola bahan bakar dengan kernel UO₂ dan bola moderator dengan densitas grafit spesifik dipilih agar sesuai dengan desain mutakhir HTR *pebble bed*. Pustaka data nuklir energi kontinu ENDF/B-VI^[8] dimanfaatkan untuk melengkapi analisis optimasi moderasi.

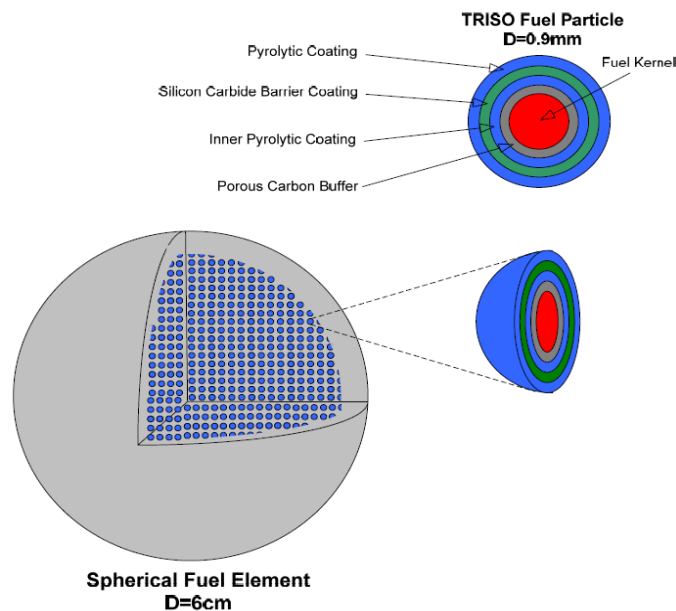
2. METODE PENELITIAN

2.1. Deskripsi HTR Pebble Bed

Teras HTR *pebble bed* pada umumnya berisi ratusan ribu bola bahan bakar dimana porositas di antara celah-celahnya dialiri pendingin gas helium. Volume helium dari total volume teras reaktor diperkirakan sekitar 6%. Setiap *pebble* yang berdiameter 6 cm terdiri atas 5.000 hingga 20.000 partikel bahan bakar berlapis TRISO. Partikel berlapis (diameter 500

μm) dengan *coating* empat lapisan terdispersi dalam matriks grafit di zona bagian dalam *pebble* dengan diameter 5 cm. Di zona bagian luar *pebble* terdapat *shell* grafit yang terbuat dari karbon dengan ketebalan 0,5 cm. Matriks grafit dan *shell* grafit memiliki densitas yang sama, yaitu $1,75 \text{ g/cm}^3$. Partikel berlapis TRISO mengandung kernel bahan bakar dengan balutan empat lapisan *coating* yang berfungsi menjaga integritas struktur dan mencegah lepasnya produk fisi. Lapisan 1 (*carbon buffer*, C) terbuat dari karbon dengan densitas grafit $1,05 \text{ g/cm}^3$ dan tebal $90 \mu\text{m}$. Lapisan 2 (IPyC, *inner pyrolytic carbon*) dan lapisan 4 (OpyC, *outer pyrolytic carbon*) dikomposisi oleh piro karbon dengan densitas grafit $1,05 \text{ g/cm}^3$ dan tebal masing-masing $40 \mu\text{m}$. Lapisan 3 (SiC, *silicon carbide*) terbuat dari silikon karbida dengan densitas $3,18 \text{ g/cm}^3$ dan tebal $35 \mu\text{m}$.

Komposisi dan diameter kernel bahan bakar dipertimbangkan dan diseleksi menurut desain dan kapabilitas sebuah HTR *pebble bed* yang spesifik. HTR *pebble bed* dapat menggunakan kernel dari material bahan bakar yang berbeda dalam desain reaktor yang sama, meskipun mungkin tidak pada waktu yang sama. Beberapa jenis HTR *pebble bed* dapat memanfaatkan thorium, plutonium dan uranium alam, serta uranium yang diperkaya^[9]. Proyek untuk mengembangkan *pebble* dan reaktor yang mengadopsi bahan bakar MOX (*mixed-oxide*) juga sedang berlangsung di beberapa institusi riset nuklir di dunia. Bahan bakar MOX merupakan campuran uranium dan plutonium yang berasal dari bahan bakar bekas reaktor air tekan PWR (*pressurized water reactor*) atau reaktor air didih BWR (*boiling water reactor*) yang diolah-ulang atau bahan bakar hulu ledak nuklir yang didekomisioning.

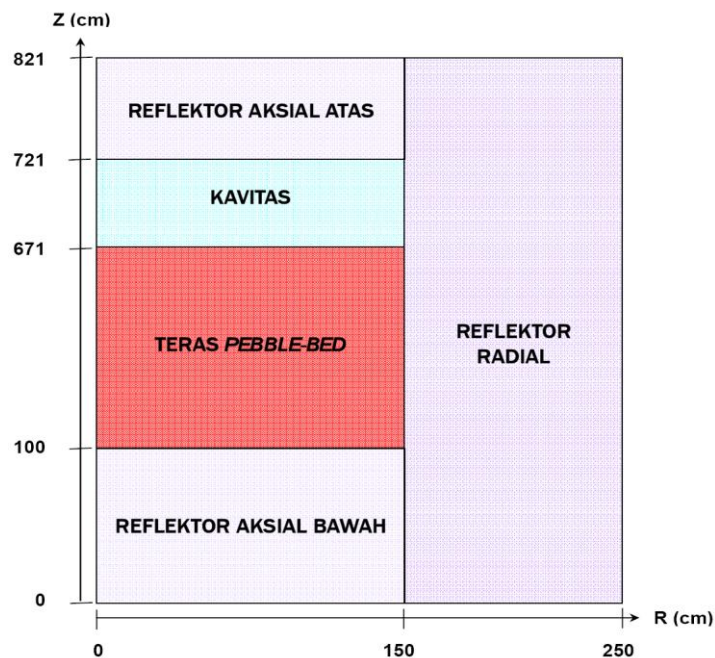


Gambar 1. Skema Geometrik Bola Bahan Bakar HTR Pebble-Bed^[10].

Dalam studi ini, bola bahan bakar dengan kernel UO_2 dipilih agar sesuai dengan desain HTR *pebble bed* mutakhir seperti HTR-PM (*high temperature reactor pebble-bed modular*)^[12] Cina dan PBMR Afrika Selatan yang keduanya didasarkan pada desain HTR-MODUL^[13] Jerman. Kernel UO_2 memiliki pengkayaan uranium $^{235}\text{U}/(^{235}\text{U}+^{238}\text{U})$ sebesar 8,2%. Massa bahan bakar per bola 10,210 g dan massa karbon dalam bola moderator 189,1 g. Bola bahan bakar dengan radius 3 cm dan densitas $10,4 \text{ g/cm}^3$ bersama bola moderator dengan radius 3 cm dan densitas $1,84 \text{ g/cm}^3$ dimuatkan ke dalam teras reaktor. Skema geometrik bola bahan bakar HTR *pebble-bed* diperlihatkan dalam Gambar 1 dan spesifikasi detail bola bahan bakar dan partikel berlapis TRISO disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Bola Bahan Bakar HTR *Pebble Bed* dan Partikel Berlapis TRISO^[11]

Parameter	Nilai
Bola bahan bakar:	
Diameter bola (cm)	6,0
Radius zona bahan bakar (cm)	2,5
Ketebalan <i>shell</i> grafit (cm)	0,5
Densitas <i>shell</i> grafit (g/cm ³)	1,75
Impuritas boron alam dalam <i>shell</i> grafit (ppm)	0,5
Jumlah partikel berlapis per bola	15.000
Massa bahan bakar per bola (g)	10,210
Fraksi <i>packing</i> bola (%)	61
Partikel berlapis:	
Radius kernel bahan bakar (mm)	0,25
Densitas kernel bahan bakar (g/cm ³)	10,4
Impuritas boron alam dalam kernel (ppm)	1
Densitas matriks grafit (g/cm ³)	1,75
Impuritas boron alam dalam matriks grafit (ppm)	0,5
Material <i>coating</i>	C/IPyC/SiC/OPyC
Ketebalan <i>coating</i> (mm)	0,09/0,04/0,035/0,04
Densitas <i>coating</i> (g/cm ³)	1,05/1,9/3,18/1,9
Fraksi <i>packing</i> partikel berlapis (%)	9,043

**Gambar 2. Skema Geometrik Teras HTR *Pebble-Bed***

Fasilitas HTR *pebble bed* terdiri dari silinder grafit dengan kavitas sentral. Tinggi silinder 721 cm dan radiusnya 250 cm. Kavitas dimulai dari ketinggian 571 cm di atas dasar reflektor aksial bagian bawah dengan diameter 300 cm dan ketebalan 50 cm. Reflektor aksial bagian atas dan bagian bawah mempunyai ketebalan aksial yang sama, yaitu 100 cm sedangkan reflektor radial memiliki ketebalan radial 100 cm. Bola bahan bakar dan bola moderator ditempatkan dalam teras reaktor berdiameter 150 cm dan tinggi 471 cm. Teras HTR *pebble-bed* dengan volume 33.306 m³ dimuati oleh 294.375 bola dengan komposisi bola bahan bakar dan bola moderator sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan. Skema geometrik 2-D R-Z teras HTR *pebble-bed* diperlihatkan dalam Gambar 2.

2.2. Metode Perhitungan

Tidak seperti pendingin air dalam reaktor air ringan LWR, yakni reaktor air tekan PWR dan reaktor air didih BWR, yang juga berfungsi sebagai moderator, dalam HTR pendingin helium yang bersifat *inert* tidak memoderasi serta menyerap neutron. Kualitas moderasi HTR *pebble bed* sangat dipengaruhi oleh rasio bola bahan bakar (F) dan bola moderator (M) yang menyusun teras reaktor. Moderasi optimal dapat dicapai dengan mengatur rasio F/M, namun rasio F/M lebih dari 1:1 dalam teras reaktor *pebble bed* menimbulkan masalah dalam perhitungan seperti spesifikasi rasio F/M 57:43 yang digunakan dalam teras *start-up* HTR-10. Masalah ini menyangkut pemilihan kisi yang menggambarkan kombinasi bola dengan rasio F/M yang tidak lazim. Dengan mensubstitusi ukuran bola moderator untuk mendapatkan rasio F/M yang diinginkan, masalah ini dapat diselesaikan.

Dalam metode ini, radius bola moderator (r) diubah mengikuti persamaan:

$$r = R^3 \sqrt{\frac{M}{F}} \quad (1)$$

dengan R adalah radius bola bahan bakar, M dan F masing-masing menunjukkan jumlah bola moderator dan bola bahan bakar dalam teras *pebble bed*.

Kandungan dua bola dari sel kisi satuan BCC (*body centered cubic*) memudahkan untuk mengubah ukuran bola moderator sementara ukuran original bola bahan bakar dijaga konstan untuk mempertimbangkan efek heterogenitas ganda. Karena radius bola moderator berubah, ukuran sel kisi satuan (a) kemudian harus disesuaikan agar fraksi *packing* (f) tetap konstan mengikuti persamaan:

$$a = R^3 \sqrt{\frac{4\pi \left(1 + \frac{M}{F}\right)}{3f}} \quad (2)$$

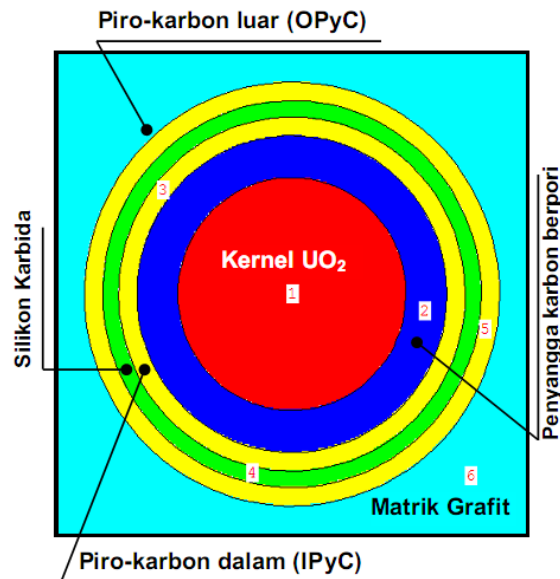
Sebagai contoh, dalam spesifikasi rasio F/M 57:43 radius bola moderator direduksi dari 3 cm ke 2,730984 cm dan ukuran sel kisi satuan direduksi dari 7,185259 cm ke 6,878190 cm agar fraksi *packing* bola tetap 61%. Hasil perhitungan radius bola moderator dan ukuran sel satuan dengan metode substitusi radius bola moderator dirangkum dalam Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Radius Bola Moderator dan Ukuran Sel Satuan dengan Metode Substitusi Radius Bola Moderator

Rasio F/M	Radius Bola Bahan Bakar (R , cm)	Radius Bola Moderator (r , cm)	Ukuran Sel Satuan (a , cm)
1 : 4	3	4,762203	9,751897
1 : 2	3	3,779763	8,225068
3 : 4	3	3,301927	7,564113
1 : 1	3	3,000000	7,185259
5 : 4	3	2,784953	6,937291
3 : 2	3	2,620741	6,761588
7 : 4	3	2,489480	6,630261
2 : 1	3	2,381101	6,528241
9 : 4	3	2,289428	6,446630
5 : 2	3	2,210419	6,379820
11 : 4	3	2,141298	6,324099
3 : 1	3	2,080084	6,276902

2.3. Model Perhitungan

Dalam perhitungan, pemodelan HTR *pebble bed* diawali dengan memodelkan partikel bahan bakar berlapis TRISO secara detail dan eksplisit seperti diperlihatkan dalam Gambar 3. Densitas partikel berlapis diberikan dalam Tabel 3.



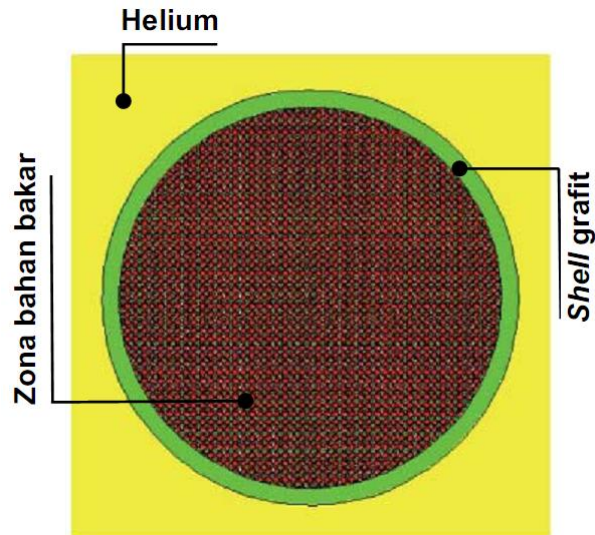
Gambar 3. Model MCNP5 Partikel Berlapis TRISO

Partikel berlapis dimodelkan dengan sel kisi kubik sederhana SC (*simple cubic*) dengan fraksi *packing* 9,043% yang menghasilkan ukuran sel kisi sebesar 0,1634287 cm. Sebanyak 15.000 partikel berlapis dalam matriks grafit didistribusikan secara acak ke dalam bola bahan bakar. Model bola bahan bakar didekati menggunakan sel kisi kubik partikel berlapis secara berulang seperti ditunjukkan dalam Gambar 4. Densitas atom matriks grafit kernel dan *shell* grafit bola bahan bakar HTR *pebble bed* diberikan dalam Tabel 4.

Tabel 3. Densitas Atom Partikel Berlapis Bahan Bakar HTR *Pebble Bed*

Nuklida	Densitas Atom (atom/barn-cm)				
	Kernel UO ₂	Lapisan Kernel			
		Carbon buffer	IPyC	SiC	OPyC
²³⁵ U	1,92585E-3	0,0	0,0	0,0	0,0
²³⁸ U	2,12877E-2	0,0	0,0	0,0	0,0
Oksigen	4,64272E-2	0,0	0,0	0,0	0,0
Karbon	0,0	5,26449E-2	9,52621E-2	4,77240E-2	9,52621E-2
Silikon	0,0	0,0	0,0	4,77240E-2	0,0
¹⁰ B	1,14694E-7	0,0	0,0	0,0	0,0
¹¹ B	4,64570E-7	0,0	0,0	0,0	0,0

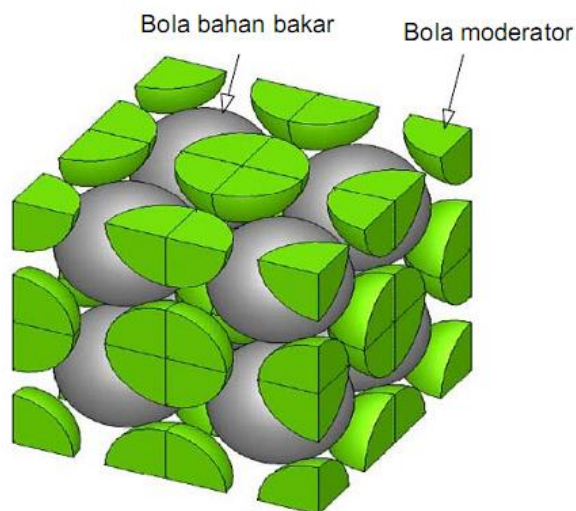
Teras *pebble bed* dimodelkan dengan kisi 3-D regular berulang dari bola yang disusun sebagai kisi BCC. Kisi ini merepresentasikan kubus dan dikarakterisasi oleh fraksi *packing* 61% yang secara tipikal dijumpai di reaktor *pebble bed*. Dalam sel kisi BCC, di pusat kisi ditempatkan bola bahan bakar sedangkan di delapan sudut kisinya masing-masing diisi oleh 1/8 bagian dari bola moderator. Gambar 5 mengilustrasikan struktur sel kisi BCC yang digunakan dalam perhitungan. Densitas atom bola moderator, reflektor grafit dan pendingin helium HTR *pebble bed* diberikan dalam Tabel 5 dan 6.



Gambar 4. Model MCNP5 Bola Bahan Bakar

Tabel 4. Densitas Atom Matriks Grafit Kernel dan Shell Grafit Bola Bahan Bakar HTR Pebble Bed

Nuklida	Densitas Atom (atom/barn-cm)	
	Matriks Grafit Kernel Bahan Bakar	Shell Grafit Bola Bahan Bakar
Karbon	8,77414E-2	18,77414E-2
¹⁰ B	9,64977E-9	9,64977E-9
¹¹ B	3,90864E-8	3,90864E-8



Gambar 5. Struktur Sel Kisi BCC

Tabel 5. Densitas Atom Bola Moderator dan Reflektor Grafit HTR Pebble Bed

Nuklida	Densitas Atom (atom/barn-cm)		
	Bola Moderator	Reflektor Aksial	Reflektor Radial
Karbon	8,38302E-2	8,61000E-2	8,84000E-2
¹⁰ B	2,40326E-8	9,00000E-9	9,20000E-9
¹¹ B	9,73442E-8	3,60000E-8	3,70000E-8

Tabel 6. Densitas Atom Pendingin HTR Pebble Bed

Nuklida	Densitas Atom (atom/barn-cm)
^3He	3,71220E-11
^4He	2,65156E-5

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam studi ini, bola bahan bakar dan bola moderator ditempatkan di dalam teras HTR *pebble bed* dengan spesifikasi rasio F/M yang berbeda. Spesifikasi ini dimaksudkan untuk mendapatkan moderasi neutron yang optimal dalam teras reaktor. *Skipping* 10 siklus iterasi dari total 110 siklus dengan 5.000 neutron per siklus disimulasikan untuk mencegah konvergensi sumber. Sumber neutron fisi awal diposisikan di pusat kernel bahan bakar. Pustaka data nuklir energi kontinu ENDF/B-VI dimanfaatkan dengan temperatur kamar 300K. Interaksi neutron termal dengan grafit di bawah energi ~4 eV dipertimbangkan untuk seluruh material yang mengandung karbon dengan pustaka hamburan termal $S(\alpha,\beta)$ *graph.01t*. Kondisi vakum dikerjakan pada batas luar dari sistem reaktor HTR *pebble bed*.

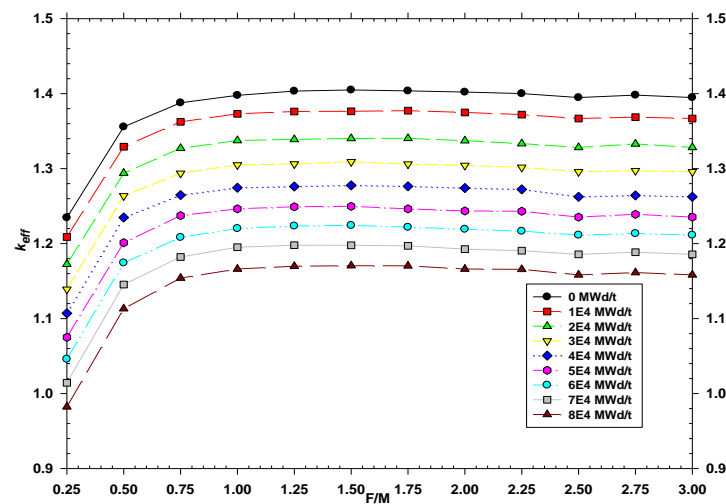
Hasil perhitungan faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) dengan MCNP5 dan pustaka data nuklir ENDF/B-VI dirangkum dalam Tabel 7. Nilai fraksi bakar diadopsi dari hasil perhitungan Monte Carlo oleh Tombakoglu^[11]. Dari Tabel 7 dapat diamati bahwa nilai k_{eff} semakin rendah dengan bertambahnya fraksi bakar. Ini disebabkan oleh berkurangnya utilisasi neutron termal dan neutron cepat akibat terbakarnya ^{235}U dalam teras reaktor. Nilai k_{eff} memiliki tendensi semakin meningkat dengan bertambahnya rasio F/M kemudian menurun secara perlahan setelah mencapai nilai tertentu.

Tabel 7. Hasil Perhitungan k_{eff} dengan MCNP5 dan Pustaka ENDF/B-VI

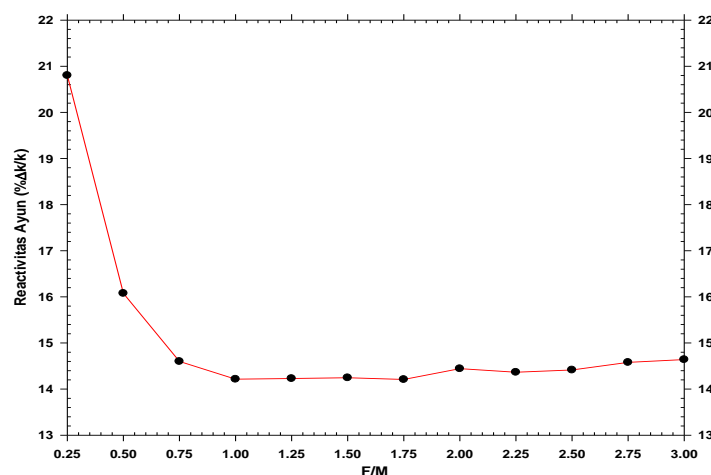
Rasio F/M	Faktor Multiplikasi Efektif (k_{eff})								
	0 MWd/t	10,000 MWd/t	20,000 MWd/t	30,000 MWd/t	40,000 MWd/t	50,000 MWd/t	60,000 MWd/t	70,000 MWd/t	80,000 MWd/t
1 : 4	1,23456 ±0,00099	1,20883 ±0,00094	1,17248 ±0,00100	1,13907 ±0,00088	1,10703 ±0,00090	1,07498 ±0,00090	1,04601 ±0,00092	1,01434 ±0,00088	0,98230 ±0,00082
1 : 2	1,35575 ±0,00110	1,32919 ±0,00097	1,29402 ±0,00098	1,26367 ±0,00087	1,23481 ±0,00107	1,20119 ±0,00101	1,17435 ±0,00111	1,14539 ±0,00093	1,11313 ±0,00083
3 : 4	1,38784 ±0,00113	1,36247 ±0,00083	1,32712 ±0,00090	1,29371 ±0,00113	1,26467 ±0,00106	1,23733 ±0,00099	1,20837 ±0,00097	1,18217 ±0,00098	1,15401 ±0,00102
1 : 1	1,39776 ±0,00104	1,37311 ±0,00102	1,33746 ±0,00115	1,30487 ±0,00092	1,27453 ±0,00107	1,24637 ±0,00094	1,22016 ±0,00101	1,19519 ±0,00110	1,16607 ±0,00088
5 : 4	1,40348 ±0,00109	1,37619 ±0,00112	1,33894 ±0,00113	1,30623 ±0,00106	1,27617 ±0,00100	1,24912 ±0,00102	1,22350 ±0,00105	1,19785 ±0,00106	1,16984 ±0,00096
3 : 2	1,40487 ±0,00106	1,37645 ±0,00105	1,34023 ±0,00094	1,30909 ±0,00106	1,27773 ±0,00107	1,24969 ±0,00111	1,22431 ±0,00113	1,19774 ±0,00102	1,17058 ±0,00106
7 : 4	1,40371 ±0,00097	1,37731 ±0,00100	1,34036 ±0,00106	1,30606 ±0,00092	1,27645 ±0,00109	1,24633 ±0,00115	1,22186 ±0,00099	1,19707 ±0,00118	1,17029 ±0,00105
2 : 1	1,40218 ±0,00117	1,37485 ±0,00107	1,33722 ±0,00107	1,30424 ±0,00112	1,27417 ±0,00113	1,24354 ±0,00115	1,21927 ±0,00115	1,19268 ±0,00113	1,16603 ±0,00108
9 : 4	1,40014 ±0,00115	1,37205 ±0,00098	1,33331 ±0,00107	1,30173 ±0,00097	1,27231 ±0,00109	1,24317 ±0,00102	1,21662 ±0,00120	1,19057 ±0,00105	1,16568 ±0,00105
5 : 2	1,39860 ±0,00113	1,37005 ±0,00102	1,33824 ±0,00108	1,29946 ±0,00100	1,26898 ±0,00102	1,23863 ±0,00100	1,21214 ±0,00107	1,19117 ±0,00103	1,16394 ±0,00104
11 : 4	1,39809 ±0,00118	1,36859 ±0,00115	1,33293 ±0,00105	1,29724 ±0,00107	1,26432 ±0,00109	1,23903 ±0,00117	1,21347 ±0,00117	1,18855 ±0,00121	1,16137 ±0,00102
3 : 1	1,39483 ±0,00115	1,36681 ±0,00097	1,32824 ±0,00109	1,29580 ±0,00098	1,26240 ±0,00103	1,23529 ±0,00104	1,21139 ±0,00108	1,18569 ±0,00117	1,15829 ±0,00113

Jika hasil perhitungan dalam Tabel 7 diplot ke dalam Gambar 6, maka terlihat bahwa rasio F/M yang besar menyebabkan nilai k_{eff} berkurang karena tangkapan resonansi neutron (*under-moderated*). Rasio F/M yang kecil menyebabkan nilai k_{eff} berkurang karena absorpsi neutron parasitik oleh moderator (*over-moderated*). Kecenderungan ini berlaku untuk berbagai nilai fraksi bakar bahan bakar. Ini berarti sifat moderasi neutron tetap konsisten dalam teras yang mengalami fraksi bakar.

Nilai k_{eff} maksimum yang dihitung dari teras secara esensial menunjukkan jumlah tumbukan neutron dalam moderator yang menurunkan energi dari 2 MeV ke 1 eV memiliki probabilitas yang paling besar. Dari Gambar 6 didapatkan pula bahwa jika reaktor dimuati *pebble* dengan rasio F/M 3:2 atau 1,5 maka faktor multiplikasi neutron mencapai maksimum. Dalam keadaan reaktor seperti ini, ekonomi neutron dikatakan paling efisien dan moderasi neutron berada di puncaknya.



Gambar 6. Hasil Perhitungan k_{eff} Sebagai Fungsi F/M dan Fraksi Bakar



Gambar 7. Hasil Perhitungan Reaktivitas Ayun Sebagai Fungsi Rasio F/M

Gambar 7 mengilustrasikan reaktivitas ayun yang berkurang dengan bertambahnya rasio F/M. Reaktivitas ayun didefinisikan sebagai perbedaan reaktivitas antara awal siklus (BOC, *beginning of cycle*) dan akhir siklus (EOC, *end of cycle*) dari operasi reaktor. Perbedaan

reaktivitas yang disebabkan oleh fraksi bakar ini seharusnya dijaga serendah mungkin untuk menghindari seringnya pergerakan batang kendali yang mengkompensasi kehilangan reaktivitas akibat terbakarnya bahan bakar dalam teras reaktor. Rasio F/M 1,5 menghasilkan reaktivitas ayun yang relatif rendah ($14,25\% \Delta k/k$) dan ini sering menjadi pilihan yang tepat dalam desain HTR *pebble bed*.

4. KESIMPULAN

Studi optimasi moderasi neutron dalam teras HTR *pebble bed* telah dilakukan dengan melakukan serangkaian perhitungan menggunakan program transport Monte Carlo MCNP5 dan pustaka data nuklir energi kontinu ENDF/B-VI.

Hasil perhitungan memperlihatkan bahwa nilai k_{eff} memiliki tendensi semakin meningkat dengan bertambahnya rasio F/M kemudian menurun secara perlahan setelah mencapai nilai tertentu. Rasio F/M yang besar menyebabkan nilai k_{eff} berkurang karena tangkapan resonansi neutron (*under-moderated*). Rasio F/M yang kecil menyebabkan nilai k_{eff} berkurang karena absorpsi neutron parasitik oleh moderator (*over-moderated*).

Dari seluruh hasil perhitungan dapat disimpulkan bahwa optimasi moderasi neutron dalam teras HTR *pebble bed* dicapai dengan kombinasi bola yang dispesifikasikan oleh rasio F/M 3:2.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih kami sampaikan kepada Dr. Ir. M. Dhandhang Purwadi yang memberikan motivasi dan inspirasi untuk melakukan riset ini. Terimakasih kami sampaikan pula kepada Prof. Surian Pinem, M.Si atas dorongan dan dukungan semangat yang membesarkan hati kami. Koreksi dan saran dari Ir. Djati H. Salimy, M.Eng. dan Ir. Erlan Dewita, M. Eng. yang amat berarti dan bermanfaat untuk perbaikan makalah ini, sangat kami hargai.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, "Energy Technology Perspectives: Scenarios & Strategies to 2050", Technical report, OECD/IEA, France, 2008.
- [2]. U.S. DOE, "Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum, A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems", December 2002.
- [3]. LOHNERT, G. H., "Topical Issue on Japan's HTTR, Nuclear Engineering and Design", 233(1-3), 2004.
- [4]. LOHNERT, G. H., "Topical Issue on China's HTR-10, Nuclear Engineering and Design", 218(1-3), 2002.
- [5]. KOSTER, A., MATZNER, H. D., NICHOLSI, D. R., PBMR "Design for the Future, Nuclear Engineering and Design", 222:231-245, 2003.
- [6]. GENERAL ATOMICS, GT-MHR "Conceptual Design Description Report", GA/NRC-337-02, August 2002.
- [7]. BROWN, F. B., *et al.*, MCNP – A "General Monte Carlo N-Particle Transport Code", Version 5, LA-UR-03-1987, April 24, 2003.
- [8]. HENDRICKS, J. S., FRANKLE, S. C., COURT, J. D., ENDF/B-VI Data for MCNP, Los Alamos National Laboratory Report, LA-12891, 1994.
- [9]. GRENECHE, D., "HTR Fuel Cycles: A Comprehensive Outlook of Past Experience and an Analysis of Future Options", ICAPP Conference, 2003.

- [10]. DAVID. E, AMES II, "Configuration Adjustment Potential of the Very High Temperature Reactor Prismatic Cores with Advanced Actinide Fuels", Master of Science Thesis, Department of Nuclear Engineering, Texas A&M University, 2006.
- [11]. HOSKING, G., NEWTON, T. D., "Results of Benchmark Considering a High-Temperature Reactor (HTR) Fuelled with Reactor-grade Plutonium", Physics of Plutonium Recycling, Volume VIII, OECD/NEA Nuclear Science Committee, 2007.
- [12]. ZHANG, Z., WU, Z., LI, F., "Design Aspects of the Chinese Modular High-Temperature Gas-Cooled Reactor HTR-PM", Nuclear Engineering and Design, 236: 485-490, 2006.
- [13]. REUTLER, H., LOHNERT, G. H., "The Modular High-Temperature Reactor", Nuclear Technology, Volume 62, No. 22, July 1983.